

Potentiel des matériaux à gradient de propriétés pour applications nucléaires

O. BOUAZIZ

Chaire AREVA-Mines-ParisTech, CNRS UMR 7633, B.P. 87, 91003 Evry Cedex, France

Résumé :

Le potentiel des matériaux à gradient de propriétés est illustré pour les applications dans le domaine du nucléaire. Cette stratégie de développement semble très prometteuse en particulier pour optimiser la tenue en température et la ténacité.

Abstract :

The potential of functionally graded materials is highlighted for nuclear applications. This strategy seems very promising in order to optimize the combination between high temperature resistance and toughness.

Mots clefs : gradient, ténacité, fluage, tube

1 Motivations

Comme pour d'autres domaines applicatifs, dans le secteur du nucléaire, les cahiers des charges deviennent de plus en plus exigeants (ténacité, tenue en température, tenue à la corrosion, tenue à l'irradiation) conduisant souvent à des requêtes contradictoires qu'un unique matériau monolithique ne peut remplir (FIG. 1). La Figure 2 illustre concrètement le conflit entre tenue en température et ténacité par comparaison des performances de l'acier Eurofer standard et une version durcie par dispersion d'oxydes (Oxide Dispersion Strengthened : ODS) [1]. En effet si la solution ODS améliore les performances à hautes températures, elle s'avère moins convaincante pour la ténacité à l'initiation et à la propagation.

Face à ces exigences, en complément des stratégies usuelles d'optimisation des microstructures, se développe actuellement une ingénierie des matériaux incluant une structuration à l'échelle mésoscopique (matériaux architecturés) [2-4]. Les structures sandwich, les câbles, les mousses, les matériaux à gradients sont autant d'exemples de cette approche de « contournement » des limitations intrinsèques des matériaux massifs. Afin d'évaluer ce type de stratégie, le potentiel des matériaux à gradient de microstructure est actuellement examiné. Dans le cadre de cette publication, il sera en particulier illustré l'intérêt :

- pour le compromis résistance-ténacité des aciers,
- pour la tenue au fluage des structures tubulaires.

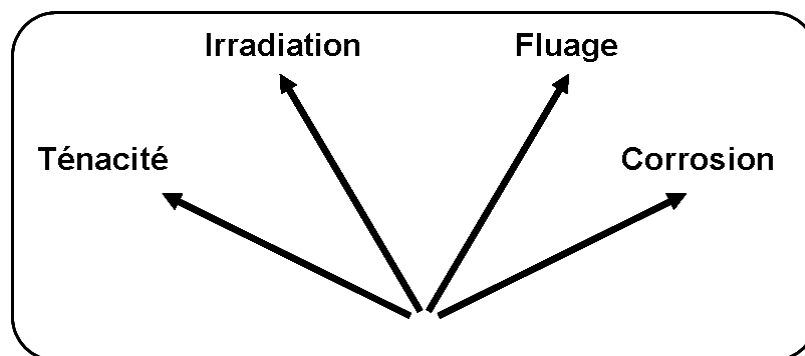
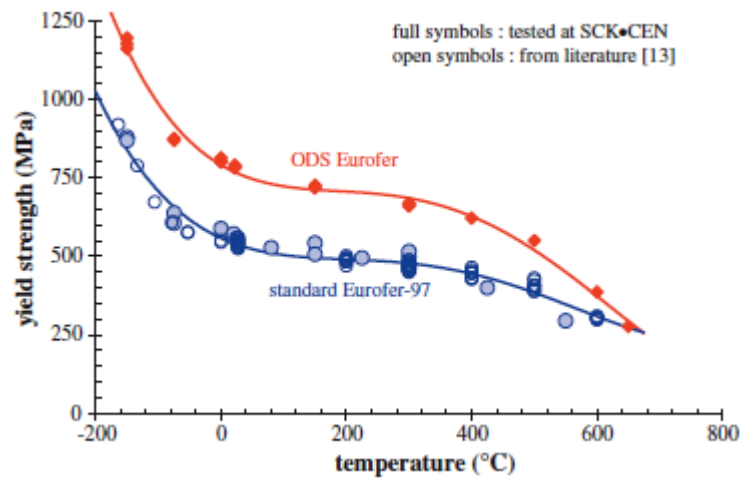
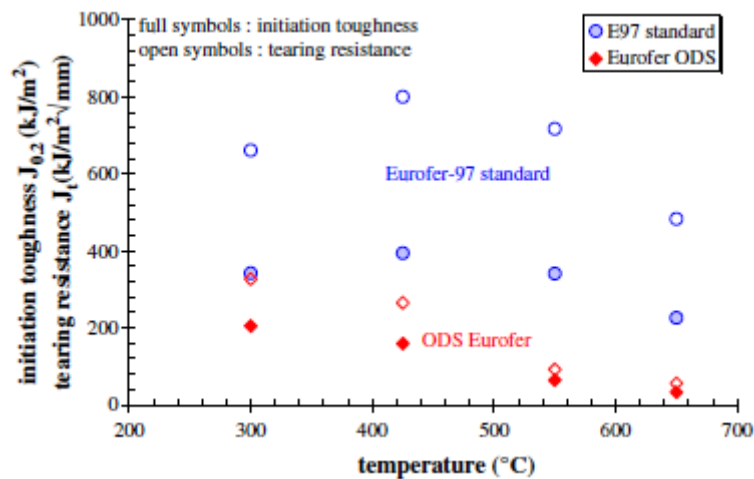


FIG. 1 – Principales exigences menant à des cahiers des charges contradictoires pour les applications nucléaires



a.



b.

FIG. 2 – Evolutions comparées de la tenue en température et de la ténacité entre l'acier Eurofer standard et la version ODS [1]

2 Ténacité et gradient de propriétés

L'effet positif d'un gradient de limite d'élasticité sur la ténacité a été particulièrement étudié par la communauté russe par décarburation d'aciers au carbone après usinage d'éprouvettes à double-entailles [5,6]. Un tel bénéfice sur une nuance martensitique à 0,38pds% de carbone, présentant une ténacité faible à l'état monolithique, est illustré FIG.3.

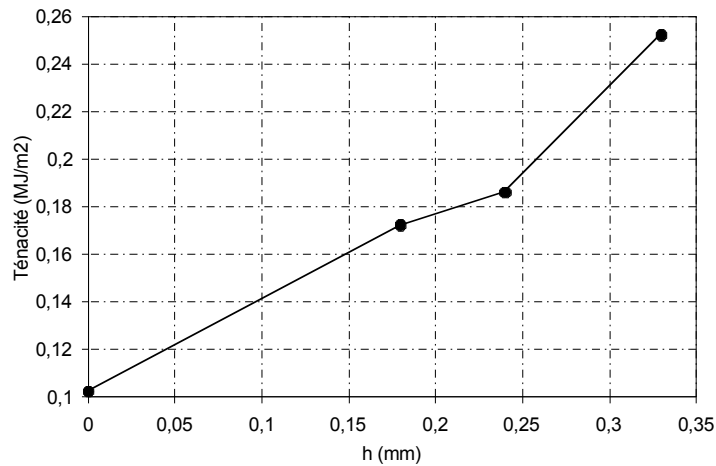


FIG. 3 – Evolution de la ténacité en fonction de l'épaisseur décarburée [5]

Par ailleurs, aucune tentative de modélisation de ce type de résultats n'a été tentée. Il existe cependant un cadre théorique adapté au cas de l'initiation d'une fissure plongée dans un gradient de limite d'élasticité en Mode I (FIG.4). Dans cette configuration il a été établi que la force motrice pour l'initiation de la fissure s'exprime comme [7]:

$$J_{tot} = J_h \left(1 - \frac{r_p}{\sigma_y} \cdot \frac{d\sigma_y}{dx} \right) \quad (1)$$

où J_h est la force motrice dans le cas homogène, σ_y la limite d'élasticité et r_p la taille de la zone plastique.

Afin d'évaluer cette approche, les données nécessaires ont été extraites et reportées dans le Tableau 1. La Figure 5 montre qu'il est possible d'obtenir un excellent accord entre la ténacité expérimentale et la ténacité prédite si la taille de la zone plastique est égale à l'épaisseur décarburée. Cette constatation semble montrer que la rupture du matériau est contrôlée par le développement de la zone plastique dans la zone décarburée plus ductile jusqu'à atteindre le cœur dur et fragile. Ce mécanisme pourrait être utilisé dans le domaine du nucléaire pour améliorer notablement les compromis résistance-ténacité.

Epaisseur décarburée (mm)	σ_y (MPa)	$\frac{d\sigma_y}{dx}$ (MPa/mm)	Ténacité (MJ/m²)
0	1620	0	0,102
0,18	1560	2733	0,172
0,24	1480	2233	0,186
0,33	1410	1842	0,252

TAB. 1 – Paramètres extraits de [5] pour la modélisation de la ténacité.

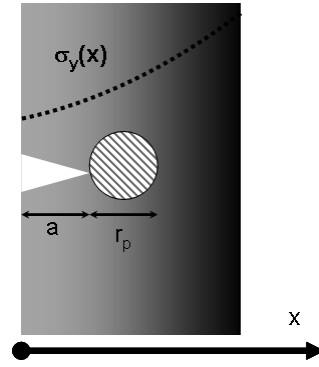


FIG. 4 – Configuration d’une fissure en Mode I dans un matériau à gradient de limite d’élasticité

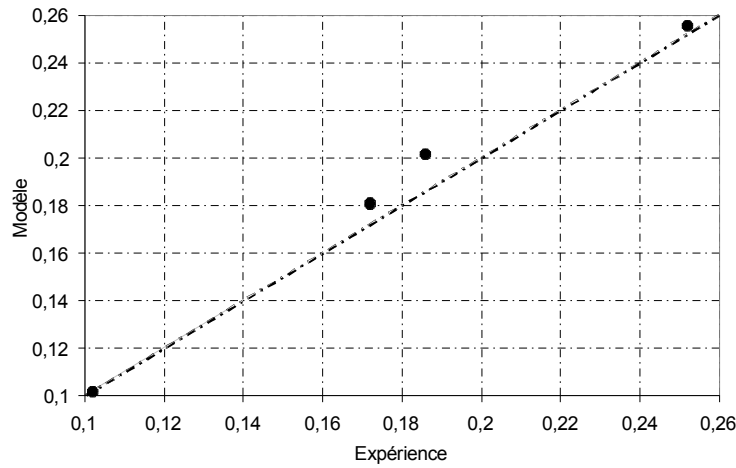


FIG. 5 – Comparaison entre la ténacité modélisée et expérimentale

3 Fluage et gradient de propriétés

Que ce soit pour les gaines contenant le combustible ou pour les tubes des générateurs de vapeur, le fluage des structures tubulaires constitue un sujet de réflexion majeur dans le domaine du nucléaire. C’est pourquoi le fluage d’un tube de rayon intérieur a et de rayon extérieur b soumis à une pression interne p est à présent abordé. Dans le cadre de cette publication, le tube présente en outre un gradient radial de propriétés de fluage traduit par une loi puissance :

$$\dot{\epsilon}_{eq} = k(r) \cdot \sigma_{eq}^n \quad (2)$$

où la complaisance viscoplastique évolue radialement comme :

$$k(r) = k_o \cdot r^{k_1} \quad (3)$$

Avec ces hypothèses, la vitesse de déformation équivalente ainsi que l’ensemble des composantes du tenseur de contraintes ont été établies [8] :

$$\dot{\epsilon}_{eq} = k_o \left(\frac{\sqrt{3}(2+k_1)p}{2n \left(a^{\frac{2+k_1}{n}} - b^{\frac{2+k_1}{n}} \right)} \right)^n r^{-2} \quad (4)$$

$$\sigma_r = p \frac{\left(b^{\frac{2+k_1}{n}} - r^{\frac{2+k_1}{n}} \right)}{\left(a^{\frac{2+k_1}{n}} - b^{\frac{2+k_1}{n}} \right)} \quad (5)$$

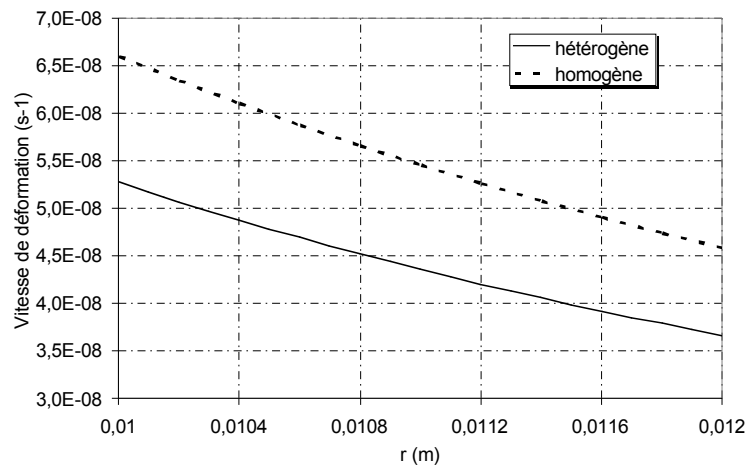
$$\sigma_\theta = p \frac{\left(b^{\frac{2+k_1}{n}} + \frac{2+k_1-n}{n} r^{\frac{2+k_1}{n}} \right)}{\left(a^{\frac{2+k_1}{n}} - b^{\frac{2+k_1}{n}} \right)} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \quad (7)$$

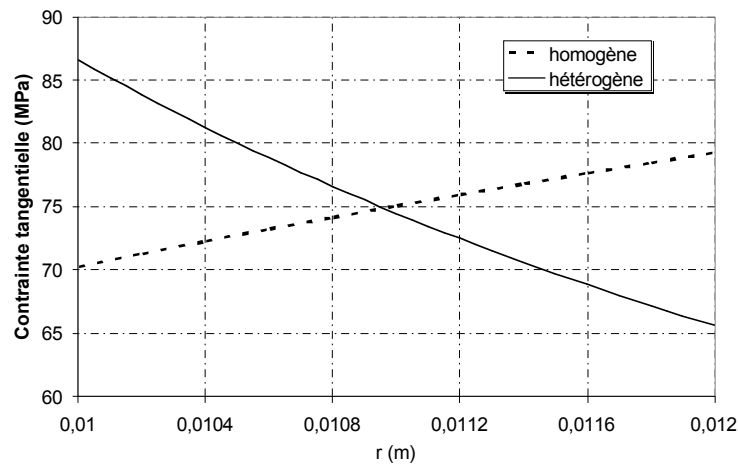
Afin d'illustrer quantitativement l'impact d'un tel gradient de résistance au fluage par rapport à une solution homogène, la complaisance moyenne est à présent définie comme :

$$\begin{aligned} \langle k \rangle &= \frac{k_o}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b r^{k_1} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \\ &= \frac{2k_o}{(b^2 - a^2)} \frac{(b^{k_1+2} - a^{k_1+2})}{k_1 + 2} \end{aligned} \quad (8)$$

Pour l'application numérique a et b sont fixés respectivement à 10 et 12mm et n est pris égal à 5. La FIG.5.a. illustre l'évolution de la vitesse de déformation en fonction de la coordonnée radiale à travers la section du tube pour k_1 égal à 10 (menant à un rapport de complaisance proche de 6 entre le rayon interne et le rayon externe) avec une comparaison systématique avec la solution homogène à même complaisance viscoplastique moyenne. La distribution de la contrainte tangentielle est reportée sur la FIG.5.b. Ces résultats montrent qu'il est possible d'améliorer la tenue au fluage du tube par un gradient de propriétés mais également de modifier notablement l'état de contrainte à travers la section. Ces degrés de liberté complémentaires peuvent être des outils de design particulièrement précieux pour le design de certains composants de centrales nucléaires.



a. Distribution de la vitesse de déformation équivalente



b. Distribution de la contrainte tangentielle

FIG. 6 –Illustration de l'effet d'un gradient radial de résistance au fluage pour un tube soumis à une pression interne

4 Conclusions et perspectives

Le potentiel des matériaux à gradient de propriétés a été brièvement illustré pour les applications structurales et notamment dans le domaine du nucléaire. Cette stratégie de développement semble très prometteuse en particulier pour optimiser la tenue en température et la ténacité. Il subsiste néanmoins des interrogations majeures qu'il faudra examiner en détail : quelle est la stabilité d'un tel gradient de microstructure sur de longues durées d'utilisation (durabilité) et quels sont les procédés pertinents pour fabriquer ces matériaux innovants?

Remerciements : AREVA est ici remercié pour son soutien et en particulier M. Caron-Charles, G. Perrin et R. Assedo pour leur précieuse implication dans la chaire AREVA-Mines-ParisTech.

Références

- [1] R. Chaouadi, G. Coen, E. Lucon, V. Massaut, *Journal of Nuclear Materials*, 403, 15–18, 2010
- [2] O. Bouaziz, Y. Bréchet, J.D. Embury, *Adv. Eng. Mat.*, Vol.10, No. 1–2, 24-36, 2008
- [3] J.D. Embury, O. Bouaziz, *Annu. Rev. Mater. Res.*, No.40, 213–241, 2010
- [4] B. Chehab, H. Zurob, J.D. Embury, O. Bouaziz, Y. Bréchet, *Adv. Eng. Mat.*, Vol.11, No. 12, 992-999, 2009
- [5] V.P. Il'Ina, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol.41, No. 1–2, 20-21, 1999
- [6] S.M. Serebrin, A.G. Rakhshadt, V.M. Seremov, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol.18, No. 8, 713-716, 1976
- [7] O. Kolednik, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.37, 781-808, 2000
- [8] L.H. You, H. Ou, Z.Y. Zheng, *Composite Structures*, Vol.78, 285–291, 2007